

О. В. НАБОКА, П. Д. АНДРИЕНКО

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПИТАНИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ ЭД9М

Предложен вариант модернизации цепей питания вспомогательных электроприводов электропоездов ЭД9М путём замены электромашинного фазорасщепителя на статический преобразователь. Разработан преобразователь позволяющий без значительных изменений в схеме питания вспомогательных электроприводов электропоезда ЭД9М повысить их мощность до 43 кВт без увеличения токовой нагрузки обмотки питания собственных нужд тягового трансформатора. Выявлены особенности управления трехфазным инвертором при наличии пульсации 100 Гц в звене постоянного тока.

Ключевые слова: активный выпрямитель, коррекция коэффициента мощности, трехфазный автономный инвертор напряжения, поцикловое ограничение тока, фазорасщепитель.

О. В. НАБОКА, П. Д. АНДРИЕНКО

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЖИВЛЕННЯ ДОПОМІЖНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ЕЛЕКТРОПОТЯГІВ ЕД9М

Запропоновано варіант модернізації ланцюгів живлення допоміжних електроприводів електропотягів ЕД9М. Розроблено перетворювач що дозволяє без значних змін схеми живлення допоміжних електроприводів електропотяга ЕД9М збільшити їх потужність до 43 кВт без збільшення струмового навантаження обмотки власних потреб тягового трансформатора. Виявлено особливості управління трифазного інвертору за наявності пульсації 100 Гц в ланцюзі постійного струму.

Ключові слова: випрямляч, корекція коефіцієнта потужності, трифазний автономний інвертор напруги, фазорозщеплювач.

O. V. NABOKA, P. D. ANDRIENKO

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF THE POWER SUPPLY OF AUXILIARY ELECTRIC DRIVES OF ED9M ELECTRIC TRAINS

A variant of upgrading the power supply circuits of auxiliary electric drives of ED9M electric trains by replacing a rotary phase converter with a static converter has been proposed. A single-phase active rectifier circuit is proposed, which makes it possible to ensure fast charging of the output capacitor. A converter has been developed that allows, without significant changes in the power supply circuit of auxiliary electric drives of the ED9M electric train, to increase their power to 43 kW. The features of three-phase inverter control in the presence of a 100 Hz pulsation at its input are revealed. As a result of tests, it was shown that by increasing the power factor and the efficiency of a static converter, it is possible to solve the problem of increasing active power while maintaining the total power consumption of the auxiliary winding of the transformer. Test results of the proposed upgrading scheme are reported.

Keywords: active rectifier, power factor correction, three-phase autonomous voltage inverter, rotary phase converter.

Введение. Характерной особенностью железных дорог Украины можно отметить значительный износ подвижного состава, который для электропоездов превышает 95 %, а их средний возраст – более 30 лет. Учитывая моральный и материальный износ, эксплуатируемые электропоезда не удовлетворяют современным требованиям как по энергоэффективности так и по комфортабельности условий перевозки пассажиров и работы локомотивных бригад. Так как быстрая замена устаревшего подвижного состава не представляется возможной по ряду экономических и технических причин – актуальной является задача модернизации существующего парка электропоездов с целью повышения их эксплуатационных характеристик.

Постановка проблемы. Подавляющее большинство эксплуатируемых в Украине электропоездов и электровазозов переменного тока, используют электромашинные фазорасщепители (ЭМФР) для питания вспомогательных машин. Недостатки ЭМФР описаны в работе [1]. К известным недостаткам ЭМФР относятся низкий КПД и коэффициент мощности, повышенный механический шум в салонах, повышенный выход из строя в связи с частыми пусками при переходе нейтральных вставок.

Поскольку ЭМФР имеют относительно высокую частоту ремонтов при длительном сроке службы – их энергетические и надёжностные показатели существенно ниже проектных. К приведенным выше недостаткам ЭМФР, в последнее время, добавляются трудности приобретения новых запасных частей, а так же сильный износ ЭМФР, который все чаще, не позволяет выполнить восстановительный ремонт. Учитывая невозможность восстановления значительной части ЭМФР, становится актуальной проблема замены их на современные аналоги. В современных электропоездах для питания трехфазных нагрузок применяются статические преобразователи [2, 3]. В существующих условиях, для продления срока службы и улучшения комфортности электропоездов, при капитальном ремонте осуществляется их частичная модернизация. К одной из таких модернизаций относится замена ЭМФР на статический фазорасщепитель (далее СФР). При этом необходимо обеспечить увеличение мощности для улучшения климатических условий в кабине машиниста и пассажирском салоне. Последнее обстоятельство приводит к увеличению необходимой мощности, которое не может быть обеспечено ЭМФР типа РФ-1Д.

© О. В. Набока, П. Д. Андриенко, 2019

При мощности нагрузки 18 кВт, потребляемая мощность от обмотки собственных нужд тягового трансформатора составляет 45 кВА. Актуальным является вопрос разработки статического преобразователя для замены ЭМФР в цепи питания вспомогательных электроприводов электропоезда ЭД9М.

Цель работы: разработка статического преобразователя для замены ЭМФР электропоездов ЭД9М, с целью улучшения энергетических показателей системы питания вспомогательных электроприводов.

Материалы исследований. В электропоездах переменного тока ЭД9М для питания трехфазных нагрузок собственных нужд применяется ЭМФР РФ-1Д, питаемый от однофазного тиристорного стабилизатора напряжения. Схема питания вспомогательных машин электропоезда ЭД9М представлена на рис. 1.

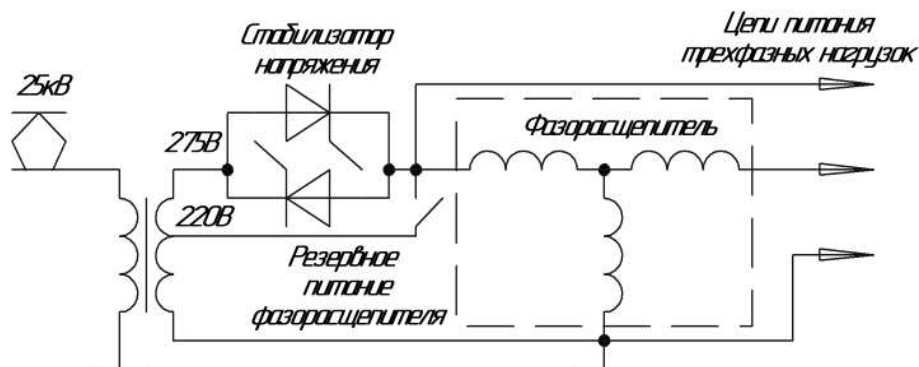


Рисунок 1 – Схема питания вспомогательных машин электропоезда ЭД9М

Идея замены ЭМФР на статический преобразователь, состоящий из полупроводникового выпрямителя, LC фильтра и автономного инвертора напряжения (АИН), для электропоезда ВЛ80, была описана в работе [1]. Применение полупроводниковых выпрямителей для питания автономных инверторов накладывает ограничения на диапазон входных напряжений и снижает коэффициент мощности преобразователя в сравнении с активными выпрямителями с ККМ. Так как ЭМФР не позволяет осуществлять частотный пуск асинхронного двигателя компрессора тормозной системы – это требует учёта влияния пусковых токов компрессора на работу цепей питания вспомогательных машин. Пусковые токи требуют увеличения установленной мощности двигателя компрессора и самого фазорасщепителя. Для осуществления частотного пуска двигателя компрессора целесообразно разделить выход трехфаз-

ного напряжения на два канала: один – для питания компрессора, второй – для всех остальных нагрузок.

Следует обратить внимание, что в схеме электропоезда ЭД9М один конец обмотки питания собственных нужд тягового трансформатора соединён с кузовом вагона. Все трехфазные нагрузки в поезде так же подключены к кузову через этот конец обмотки (одна из фаз питающего напряжения заземлена). Поэтому при замене ЭМФР на СФР необходимо изменить схему питания вспомогательных машин поезда, таким образом, чтобы все потребители были изолированы от земли.

На основании анализа возможности замены ЭМФР РФ-1Д на СФР была предложена схема модернизации системы питания вспомогательных машин электропоезда ЭД9М. На рис. 2 представлена блок-

схема модернизированной системы питания вспомогательных машин электропоезда ЭД9М.

Известно, что электромашинные фазорасщепители обладают невысоким коэффициентом мощности, для фазорасщепителя РФ-1Д5 он составляет 0,58. Применение АВ с корректором коэффициента мощности (ККМ) в качестве входного выпрямителя позволяет без увеличения токовой нагрузки обмотки собственных нужд тягового трансформатора повысить мощность питания вспомогательных машин на 70 %. В условиях эксплуатации электропоезда, фазорасщепитель большую часть времени работает в режиме частичной нагрузки. В режиме неполной нагрузки, показатели энергоэффективности ЭМФР снижаются.

Статический преобразователь с АВ для питания вспомогательных машин электропоезда позволяет работать с высоким КПД и коэффициентом мощности

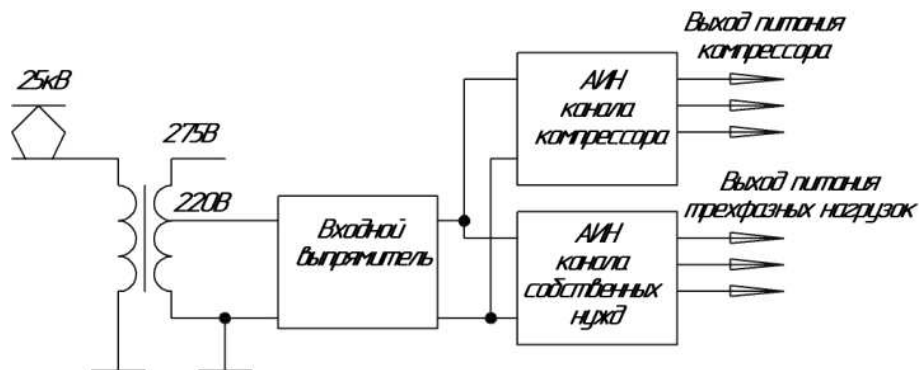


Рисунок 2 – Блок-схема модернизированной системы питания вспомогательных машин электропоезда ЭД9М

во всем диапазоне нагрузок.

Работа статического преобразователя в схеме электропоезда характеризуется широким диапазоном входного напряжения 170 ÷ 250 В. Учитывая диапазон входных и выходных напряжений целесообразно применение АВ повышающего типа. Топология АВ мостового типа является одной из наиболее распространённых топологий для АВ большой и средней мощности. На рис. 3 представлена схема однофазного мостового активного выпрямителя. К достоинствам такой схемы можно отнести высокий КПД, возможность двунаправленной передачи энергии, однако данная схема не позволяет получить напряжение в звене постоянного тока ниже, чем входное.

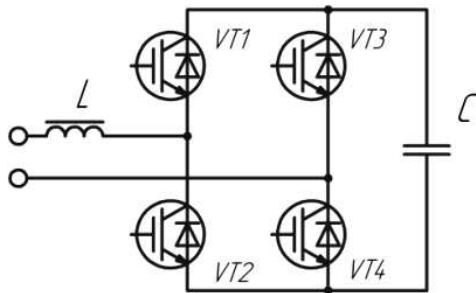


Рисунок 3 – Схема однофазного активного выпрямителя

Известно, что величина ёмкости конденсаторов звена постоянного тока для однофазных выпрямителей значительно превышает необходимую ёмкость для трехфазных выпрямителей при прочих равных условиях. Рассчитаем минимальную необходимую ёмкость конденсаторов выходного фильтра активного однофазного выпрямителя с ККМ. Предположим что форма входного тока и напряжения синусоидальны и сдвиг фаз между ними равен нулю (коэффициент мощности равен единице). Мгновенная потребляемая мощность без потерь передаётся в звено постоянного тока, тогда из условия баланса мощностей:

$$\frac{dU_c}{dt} \cdot U_c \cdot C = P_{in} - P_{out} = \frac{P_{out} \cdot \sqrt{2} \sin(\omega t)}{U_{in}} \cdot U_{in} \cdot \sqrt{2} \sin(\omega t) - P_{out}, \quad (1)$$

где U_c – напряжение звена постоянного тока;
 P_{in} – потребляемая мощность;
 P_{out} – мощность нагрузки;
 U_{in} – входное напряжение;
 C – ёмкость выходного фильтра;
 ω – круговая частота, 100л.
 Из выражения 1:

$$\frac{U_c^2 - U_{ref}^2}{C} = \frac{2 \int \left(\frac{P_{out} \sqrt{2} \sin(\omega t)}{U_{in}} \cdot U_{in} \sqrt{2} \sin(\omega t) - P_{out} \right) dt}{C},$$

где U_{ref} – уставка выходного напряжения.

Зададимся условиями: $P_{out} = 45$ кВт, $U_{ref} = 350$ В,

$U_{in} = 220$ В, минимальное допустимое напряжение на конденсаторе фильтра $U_c = 325$ В.

$$\int \left(\frac{P_{out} \sqrt{2} \sin(\omega t)}{U_{in}} \cdot U_{in} \sqrt{2} \sin(\omega t) - P_{out} \right) dt = -\frac{225 \sin(2\omega t)}{\pi}.$$

$$C = \frac{2 \cdot 225}{\pi \cdot (U_{ref}^2 - U_c^2)} = 0.0085.$$

Из расчёта следует, что ёмкость выходного фильтрующего конденсатора должна составлять не менее 8500 мкФ. Заряд такой ёмкости без ограничения тока может вызвать выход из строя оппозитных диодов силовых ключей, для предотвращения такой возможности необходима специальная схема плавного заряда выходных конденсаторов. Особенностью условий работы АВ для питания вспомогательных машин электропоездов является возможность частых отключений питающего напряжения (проезд нейтральных вставок, опускание токоприемника) с последующим повторным включением. Другой особенностью является тот факт, что вспомогательные машины электропоезда всегда работают в режиме потребителей энергии и не требуют от АВ перехода в инверторный режим. Учитывая эти два обстоятельства, можно изменить силовую схему однофазного мостового АВ путём замены в одном из плеч моста двух IGBT на SCR тиристоры, при этом обеспечить возможность плавной и быстрой зарядки выходных конденсаторов, а также, в случае необходимости, понижение напряжения звена постоянного тока, по средствам фазоимпульсного управления тиристорами. Проанализировав варианты модернизации цепей питания вспомогательных машин электропоезда ЭД9М, был разработан преобразователь, позволяющий без значительных изменений схемы электропоезда заменить ЭМФР типа РФ-1Д на СФР с улучшением основных эксплуатационных показателей. Схема предложенного преобразователя представлена на рис. 4.

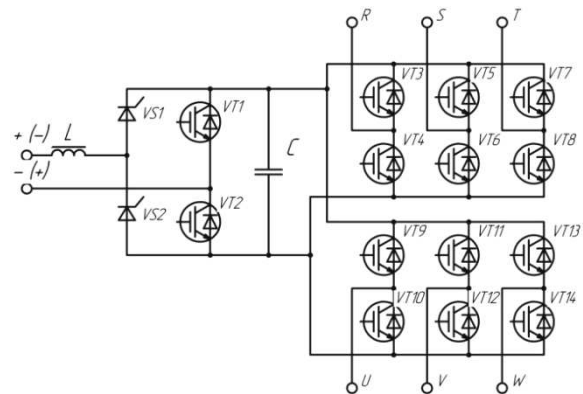


Рисунок 4 – Схема статического фазорасщепителя

Силовая схема СФР состоит из АВ (транзисторы VT1, VT2, тиристоры VS1, VS2, входной дроссель L, выходной конденсатор C) и двух однотипных трехфазных АИН (транзисторы VT3 – VT8, VT9 – VT14).

Исследованию систем управления АВ посвящено

ряд публикаций [4, 5]. Силовой трансформатор электропоездов нагружен явно выраженной нелинейной нагрузкой, такой как тяговый выпрямитель, тиристорные регуляторы напряжения и т.д. Наличие мощных нелинейных потребителей электроэнергии, как в самом поезде, так и находящихся на одной линии с ним, вызывают появление значительных гармонических искажений в спектре питающего напряжения [6]. Наличие таких искажений усложняет задачу синхронизации АВ с питающей сетью. В работе [7] предложен способ уменьшения влияния гармонических искажений питающего напряжения на коэффициент гармонических искажений формы входного тока. Реализуется это путём применения системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) для математического задания синусоидального сигнала входного напряжения.

Для управления АВ была разработана система управления, которая работает следующим образом.

В момент подачи входного напряжения, система управления активным выпрямителем (СУАВ) запускает ФАПЧ, в случае удачной синхронизации ФАПЧ с входным напряжением, СУАВ начинает заряд выходных конденсаторов, плавно уменьшая угол коммутации тиристоров VS1 и VS2. Выходным сигналом ФАПЧ является значение, которое пропорционально текущему углу входного напряжения. На основании этого значения определяется момент включения тиристоров, а так же, табличным способом вычисляется сигнал мгновенного значения входного напряжения. После окончания процесса заряда выходных конденсаторов разрешается работа транзисторов VT1, VT2. СУАВ, в зависимости от полярности входного напряжения, подаёт управляющие импульсы на одновременное включение либо VS1 и VT1 (рис. 4, полярность входного напряжения на без скобок) либо VS2 и VT2 (полярность в скобках), снятие отпирающих импульсов происходит по срабатыванию компаратора входного тока. Таким образом, реализуется поцикловое ограничение входного тока. Для упрощения схемотехнической реализации, сигнал с датчика входного тока может быть выпрямлен, это позволяет применить один компаратор, как для положительной полуволны тока так и для отрицательной. На рис. 5 представлена блок-схема системы управления АВ.

Предложенная СУАВ была реализована на микроконтроллере stm32, для ограничения тока был применён внешний аналоговый компаратор. Система состоит из ФАПЧ, выходной сигнал которой передаётся на генератор сигнала задания входного тока ГСЗ. ГСЗ преобразует сигнал фазы входного напряжения в сигнал задания тока табличным методом. Далее сигнал задания тока подаётся на умножитель, где он масштабируется в зависимости от значения ПИ регулятора напряжения звена постоянного тока. После умножения сигнал задания тока подаётся на ЦАП. Аналоговое напряжение выхода ЦАП подаётся на внешний компаратор тока. Выход компаратора подключён к входу сброса таймера ШИМ, чем обеспечивается поцикловое регулирование входного тока.

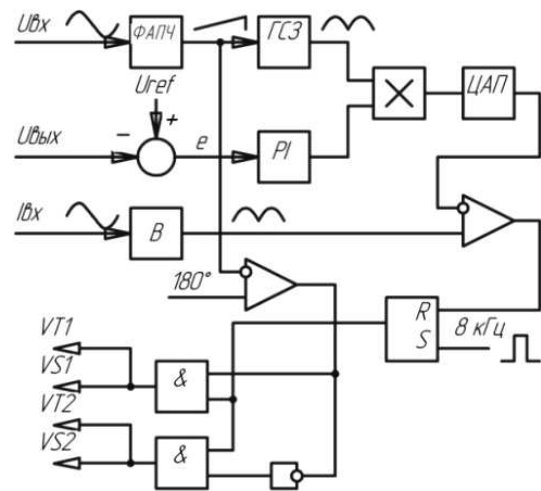


Рисунок 5 – Блок-схема системы управления активным выпрямителем

где $U_{вх}$ – мгновенное значение входного напряжения;

$U_{вых}$ – выходное напряжение активного выпрямителя;

$I_{вх}$ – мгновенное значение входного тока;

U_{ref} – задание выходного напряжения;

В – выпрямитель сигнала входного тока;

ГСЗ – генератор сигнала задания входного тока;

ПИ – пропорционально-интегральный регулятор.

За базовый алгоритм управления ключами АИН принят алгоритм векторной ШИМ.

На основании представленных схемы силовой части и системы управления был построен преобразователь М-02ТП-УЗ. При исследовании работы АИН в составе преобразователя выявлено, что пульсация напряжения 100 Гц на конденсаторе фильтра АВ приводит к появлению асимметрии выходных линейных напряжений АИН при работе на частоте близкой к номинальной. Для устранения этой асимметрии, в структурную схему системы управления АИН введена коррекция выходного напряжения в зависимости от значения мгновенного напряжения звена постоянного тока. На рис. 6 представлены осциллограммы входного напряжения и сигнала с датчика входного тока.

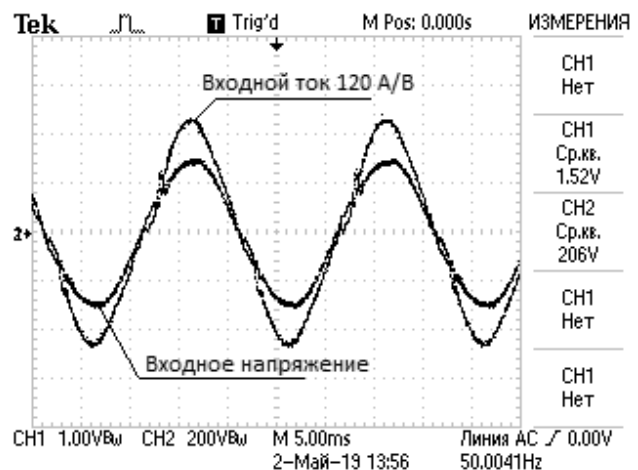


Рисунок 6 – Осциллограммы входного тока и напряжения

Измеренный коэффициент мощности в результате испытаний преобразователя М-02ТП-УЗ составил более 0,97 а КПД 93,3 %.

Выводы. Предложенный вариант модернизации цепей питания вспомогательных электроприводов электропоезда ЭД9М путём замены ЭМФР типа РФ-1Д на преобразователь М-02ТП-УЗ позволил увеличить КПД системы питания вспомогательных электроприводов электропоезда ЭД9М с 75 до 93,3 %, а коэффициент мощности с 0,58 до 0,97, что позволило решить поставленные задачи потребляя мощность от обмотки собственных нужд тягового 43,5 кВА трансформатора. Результаты пробеговых и эксплуатационных испытаний на электропоезде ЭД9М показали работоспособность предложенного варианта модернизации.

Список литературы

1. Белухин Д. С. Вариант модернизации вспомогательных электроприводов электровозов переменного тока. *Гірнична електромеханіка та автоматика*. Дніпропетровськ: ДВНЗ «Національний гірничий університет». 2015, Вип. 2 (95). С. 15 – 19.
2. Обст С., Байтлер Р. Сочлененный электропоезд FLIRT. *Железные дороги мира*. Москва: ОАО РЖД. 2007. № 5. С. 35 – 39.
3. Мюнх Т., Чуланчик Ш. Семейство преобразователей SIBEST для питания бортовых сетей подвижного состава. *Железные дороги мира*. Москва: ОАО РЖД. 2003. № 8. С. 39 – 42.
4. Якупов Д. В. Релейно-векторный регулятор тока активных выпрямителей систем частотнорегулируемого электропривода. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2008, Вип. 30. С. 464 – 467.
5. Якупов Д. В. Исследование работы регулятора напряжения активного выпрямителя частотнорегулируемого электропривода. *Гірнична електромеханіка та автоматика*. Дніпропетровськ: ДВНЗ «Національний гірничий університет». 2008. Вип. 1 (80). С. 180 – 185.
6. Мищенко Т. М. Геометричне трактування реактивної потужності та його зв'язок зі спектральним складом тягових напруги та струму швидкісних електровозів. *Електротехніка та електроенергетика*. Запоріжжя: ЗНТУ. 2015. № 2. с. 81 – 86.
7. Плахтий А. А., Нерубацкий В. П., Силантьев А. С. Анализ энергоэффективности активного выпрямителя с улучшенной гистерезисной системой управления. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. Харків: УкрДАЗТ. 2017. № 3. С. 10 – 16.

References (transliterated)

1. Beluhin D. S. Variant modernizacii vspomogatel'nyh elektropriwodov elektrovovozov peremennogo toka [Modernization of Auxiliary Electric Drives Electric Locomotives Alternating Current]. *Гірнична електромеханіка та автоматика* [Mining Electromechanics and Automation]. Dnipropetrovsk: DVNZ «Natsionalnyi hirnychi universytet». 2015, vyp. 2 (95). pp. 15 – 19.
2. Obst S., Bajtler R. Sochlenennyj elektropoezd FLIRT [Articulated Electric Train FLIRT]. *Zheleznye dorogi mira* [Joint Stock Company Russian Railways]. Moskva: OAO RZHD. 2007. № 5. pp. 35 – 39.
3. Myunh T., Chupanchich SH. Semejstvo preobrazovatelej SIBEST dlya pitaniya bortovyh setej podvizhnogo sostava [SIBEST family of converters for power supply of rolling stock networks]. *Zheleznye dorogi mira* [Joint Stock Company Russian Railways]. Moskva: OAO RZHD. 2003. № 8. pp. 39 – 42.
4. Yakupov D. V. Relejno-vektornij reguljator toka aktivnyh vypryamitelej sistem chastotnereguliruemogo elektropriroda [Relay-vector current regulator for active rectifiers of variable frequency drive systems]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»* [Bulletin of the National Technical University «KhPI»]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2008, vyp. 30. pp. 464 – 467.
5. Yakupov D. V. Issledovanie raboty reguljatora napryazheniya aktivnogo vypryamitelya chastotnereguliruemogo elektropriroda [The study of the voltage regulator of the active rectifier frequency-controlled electric drive]. *Гірнична електромеханіка та автоматика* [Mining Electromechanics and Automation]. Dnipropetrovsk: DVNZ «Natsionalnyi hirnychi universytet». 2008, vyp. 1 (80). pp. 180 – 185.
6. Mishchenko T. M. Heometrychne traktuvannia reaktyvnoi potuzhnosti ta yoho zviazok zi spektralnym skladom tiahovykh napruhy ta strumu shvydkisnykh elektrovovoziv [Geometric interpretation of reactive power and its relation to the spectral composition of traction voltage and current of high-speed electric locomotives]. *Elektrotehnika ta elektroenerhetyka* [Electrical Engineering and Power Engineering]. Zaporizhzhia: ZNTU. 2015. № 2. pp. 81 – 86.
7. Plahitij A. A., Nerubackij V. P., Silant'ev A. S. Analiz energoeffektivnosti aktivnogo vypryamitelya s uluchshenoj gisterезisnoj sistemoj upravleniya [Energy efficiency analysis of active rectifier with improved hysteresis control system]. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті* [Informaci-jno-kerujuchi systemy na zaliznychnomu transporti]. Kharkiv: UkrDAZT. 2017. № 3. pp. 10 – 16.

Поступила 30.05.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Набока Олег В'ячеславович (Набока Олег Вячеславович, Naboka Oleg Vachislavovich) – Запорізький національний технічний університет, аспірант кафедри електричних та електронних апаратів; м. Запоріжжя, Україна; e-mail: nabola.oleg1988@gmail.com

Андрієнко Петро Дмитрович (Андрієнко Петр Дмитриевич, Andrienko Petr Dmitrievich) – доктор технічних наук, професор, Запорізький національний технічний університет, завідувач кафедри електричних та електронних апаратів; м. Запоріжжя, Україна; e-mail: andrpd@ukr.net